

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA



Facoltà di ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea

PROGETTO DI CONTROLLORI DI VOLO MEDIANTE L'USO DELLE GUARDIAN MAPS

RELATORE

PROF. GIOVANNI MENGALI

CANDIDATO

MATTEO PACINI

Anno Accademico 2010-2011

URN: etd-02132012-100148

*A Lara,
per il continuo supporto,
la fiducia e l'Amore.*

*Alla mia famiglia
per il sostegno da sempre dimostrato.*

Sommario

Questo lavoro di tesi utilizza il metodo delle *Guardian Maps* per trattare la stabilità robusta di famiglie di sistemi lineari dipendenti da parametri.

Si tratta di una tecnica di sintesi che affronta il problema in due passi successivi. Il primo consiste nel tradurre i requisiti richiesti da un dato sistema dinamico in vincoli sulla posizione dei poli in ciclo chiuso; il secondo consente di selezionare i guadagni del controllore affinché questi requisiti siano soddisfatti. La metodologia si basa sull'utilizzo di polinomi reali a coefficienti reali, costruiti con particolari tecniche, a partire dalla matrice di stato del sistema.

La procedura illustrata permette anche di ottenere uno scheduling del controllore secondo un parametro, estendendo le prestazioni determinate in un certo punto di progetto ad un opportuno intervallo, il quale viene determinato sfruttando ancora le *Maps*.

Gli algoritmi descritti nella prima parte del lavoro ed implementati in Matlab, sono corredati da semplici esempi e da applicazioni tratte dalla dinamica del volo, con riferimento a due velivoli per i quali vengono descritti dettagliatamente i modelli utilizzati.

Partendo dalla configurazione "base", determinata tramite l'uso delle *Guardian Maps*, nella seconda parte della tesi si propone un procedimento che mira ad ottimizzarla, minimizzando una funzione obiettivo scalare legata all'energia dei comandi richiesta per soddisfare i requisiti di progetto. Sono impostati e confrontati diversi metodi di ottimizzazione, che sfruttano sia semplici strumenti di ricerca del minimo, che i più complessi algoritmi genetici. Questa condizione di ottimo è il punto di partenza per la sintesi del controllore di volo, i cui risultati sono presentati ed analizzati nella parte finale del lavoro.

Indice generale

Sommario	II
Introduzione	VII
Capitolo 1: Guardian Maps	1
1.1 Guardian maps	1
1.1.1 Definizioni	1
1.1.2 Esempi	2
1.2 Tecniche per determinare le <i>guardian maps</i>	2
1.3 Stabilità robusta	3
1.3.1 Esempio	3
1.4 Famiglie di matrici dipendenti da un parametro	4
Capitolo 2: Sintesi di un controllore con il metodo delle <i>guardian maps</i>	6
2.1 Introduzione	6
2.2 La <i>Target Region</i>	6
2.3 La regione degli autovalori	7
2.4 L'algoritmo di sintesi	8
2.4.1 Iterazione di confinamento dei poli in una <i>Target Region</i>	8
2.4.2 Calcolo di un vettore dei guadagni all'interno di un componente attivo	10
2.5 Esempio: controllore proporzionale integrale (P.I.)	11
2.5.1 Iterazione 1	13
2.5.2 Iterazione 2	13
2.5.3 Iterazione 3	14
2.5.4 Iterazione 4	15
Capitolo 3: Scheduling secondo un parametro	16
3.1 Introduzione	16
3.2 Algoritmo di scheduling secondo un parametro	16
3.3 Esempio: controllore proporzionale derivativo (P.D.)	17
Capitolo 4: Le qualità di volo ed i controllori scelti per il velivolo	22
4.1 Sommario	22
4.2 Le qualità di volo	22
4.2.1 Introduzione	22
4.2.1.1 Classe di velivolo	23
4.2.1.2 Fasi di volo	23
4.2.1.3 Livelli di qualità di volo	24
4.2.2 Qualità di volo longitudinali	24
4.2.3 Qualità di volo laterodirezionali	25
4.3 I controllori	26

4.3.1	Introduzione	26
4.3.2	<i>L'Attitude Hold Control System</i>	26
4.3.2.1	L'architettura	26
4.3.2.2	Le matrici in ciclo chiuso	27
4.3.2.3	Il Dropback di Gibson	28
4.3.3	Lo <i>Yaw Damper</i> con <i>Wash-out</i> e <i>Roll Damper</i>	29
4.3.3.1	L'architettura	29
4.3.3.2	Le matrici in ciclo chiuso	30
Capitolo 5: Modello della dinamica		32
5.1	Introduzione	32
5.2	Il modello linearizzato e disaccoppiato	32
5.2.1	I sistemi di riferimento	32
5.2.2	Le equazioni del moto linearizzate	33
5.2.3	Relazioni complementari	35
5.2.4	Derivate con apice	35
5.3	Derivate aerodinamiche di stabilità	35
5.4	Trasformazione da assi corpo ad assi stabilità	37
5.4.1	Trasformazione delle derivate aerodinamiche	37
5.4.2	Trasformazione dei momenti d'inerzia	38
5.5	Forma canonica in variabili di stato	38
5.6	Dinamica longitudinale	39
5.6.1	L'approssimazione di corto periodo	39
5.6.2	Espressione di poli e zeri	40
5.7	Dinamica laterodirezionale	41
5.7.1	L'approssimazione di alta frequenza	41
5.7.2	Le matrici in variabili di stato approssimate	41
5.7.3	Il modello completo	42
Capitolo 6: Modello del Boeing 747		44
6.1	Dai geometrici del velivolo	44
6.2	Calcolo delle derivate aerodinamiche longitudinali	45
6.2.1	Esempio per una data condizione di volo	47
6.3	Calcolo delle derivate aerodinamiche laterodirezionali	47
6.3.1	Esempio per una data condizione di volo	48
6.4	Sistemi di attuazione	48
6.5	Inviluppo di volo	49
Capitolo 7: Modello dell'F16		50
7.1	Dai geometrici del velivolo	50
7.2	Calcolo delle condizioni di trim	51
7.3	Coefficienti aerodinamici	51
7.3.1	Premessa	51
7.3.2	Calcolo delle derivate aerodinamiche longitudinali	52
7.3.3	Calcolo delle derivate aerodinamiche laterodirezionali	54
7.3.4	Esempio per una data condizione di volo	55
7.4	Sistemi di attuazione	56

7.5 Involuppo di volo	56
Capitolo 8: Progetto del controllore in una condizione di volo	58
8.1 Introduzione	58
8.2 Sintesi dell' <i>Attitude Hold Control System</i>	58
8.2.1 Calcolo delle matrici di ciclo aperto tramite Simulink	58
8.2.2 Risultati della sintesi	60
8.2.2.1 Sistema in ciclo chiuso	60
8.2.2.2 Risposte temporali in ciclo chiuso	61
8.2.3 Esempio per il Boeing 747	61
8.3 Sintesi dello <i>Yaw Damper</i> con <i>Wash-out</i> e <i>Roll Damper</i>	62
8.3.1 Blocco attuatori	62
8.3.2 Calcolo delle matrici di ciclo aperto	63
8.3.3 Risultati della sintesi	64
8.3.3.1 Sistema in ciclo chiuso e risposte temporali	64
8.3.4 Esempio per il Boeing 747	64
Capitolo 9: Gain Scheduling per una quota	66
9.1 Introduzione	66
9.2 Gain scheduling con calcolo simbolico	66
9.3 Algoritmo di verifica	67
9.4 Esempi di scheduling	68
9.4.1 Controllore longitudinale	68
9.4.2 Controllore laterodirezionale	68
Capitolo 10: Ottimizzazione del controllo	69
10.1 La dipendenza da K^0	69
10.1.1 La funzione obiettivo	69
10.1.2 L'esempio LQR	70
10.2 L'energia dei comandi	72
10.2.1 Introduzione	72
10.2.2 Calcolo dell'energia per il modello longitudinale	72
10.2.3 Calcolo dell'energia per il modello laterodirezionale	73
10.3 La function di ottimizzazione	75
10.3.1 Impostazioni per <i>fminsearch</i>	75
10.3.2 Ottimizzazione per una data condizione di volo	76
10.3.3 Ottimizzazione di un controllore con scheduling per una quota	76
10.4 Verifica tramite gli algoritmi genetici	77
10.4.1 Algoritmi genetici	77
10.4.2 Confronto tra i metodi	78
10.5 Scelta del procedimento di ottimizzazione	85
Capitolo 11: Postprocessing dei risultati della sintesi	86
11.1 Sommario	86
11.2 Condizioni di ottimo per il Boeing 747	86
11.2.1 Controllore longitudinale	86
11.2.2 Controllore laterodirezionale	87

11.3 Condizioni di ottimo per l'F16	88
11.3.1 Controllore longitudinale	88
11.3.2 Controllore laterodirezionale	88
11.4 Interpolazione dei guadagni	89
11.5 Funzioni di trasferimento in ciclo aperto ed in ciclo chiuso	90
11.6 Posizione dei poli in ciclo aperto ed in ciclo chiuso	90
11.7 Risposte temporali	90
11.8 Energia	91
11.9 Indice dei risultati	91
Progetto del controllore longitudinale per il Boeing 747: risultati	92
Progetto del controllore longitudinale per l'F16: risultati	151
Progetto del controllore laterodirezionale per il Boeing 747: risultati	193
Progetto del controllore laterodirezionale per l'F16: risultati	218
Conclusioni	246
Bibliografia	248
Appendice A: Prodotto bialterno	249
Appendice B: Atmosfera standard	250

Introduzione

Nell'ambito del progetto dei sistemi di controllo, in particolare in quello aeronautico, i metodi classici di sintesi risultano spesso inefficaci o molto complessi per ottenere controllori robusti che rispettino i vincoli dettati dalle Qualità di Volo, sull'intero involuppo di volo. Stabilire questi requisiti porta spesso ad utilizzare tecniche di progetto che procedono per tentativi, correggendo progressivamente la struttura del sistema di controllo fino al soddisfacimento completo dei vincoli imposti.

Tale sintesi genera sistemi di controllo con architettura variabile che, a causa della loro complessità, necessitano di una riduzione. Questo complica il lavoro del progettista, in quanto risulta più difficile sfruttare architetture standard che, grazie all'esperienza acquisita dal loro utilizzo nei controlli del volo, funzionano molto bene in situazioni diverse.

Esistono inoltre strumenti che realizzano lo scheduling per punti, progettando il controllore in numerose condizioni di trim e interpolando i risultati a posteriori senza garantire una continuità nelle prestazioni ottenute.

I problemi presentati possono essere risolti grazie all'uso della teoria delle "*Guardian Maps*". In pratica si tratta di sfruttare polinomi scalari che si annullano quando il relativo argomento matriciale o polinomiale perde la stabilità.

La tesi fa riferimento agli studi di D. Saussié et. al. presentati in [8], [9] e [10]: gli autori hanno presentato questo strumento di calcolo, corredato da esempi e applicazioni aeronautiche, che saranno ripresi ed analizzati nel presente lavoro. Questo rappresenta il punto di partenza per introdurre le *guardian maps* e per effettuare le prime prove sull'algoritmo, confrontando i risultati ottenuti con quelli riportati negli studi di cui sopra.

Mentre negli articoli citati in precedenza si propone come esempio un sistema di controllo per la dinamica longitudinale, l'analisi di questo procedimento viene ampliata considerando un'applicazione alla dinamica laterodirezionale, sfruttando un'architettura di controllore nota. In questo modo si cerca di analizzare il modo di lavorare dell'algoritmo in condizioni progettuali differenti, tendendo il più possibile ad una estensione del metodo a molteplici ambiti. Questo strumento è infatti presentato come un modo di trattare la stabilità generalizzata di matrici o polinomi, quindi può essere adattato a situazioni diverse, avendo noto il modello del sistema da controllare.

Dopo aver sviluppato in ambiente Matlab il codice di calcolo che, sfruttando la teoria delle *guardian maps*, permette di progettare un controllore robusto, il secondo obiettivo della tesi è quello ottimizzare la configurazione ottenuta. Dal punto di vista delle prestazioni del controllo, infatti, l'attenzione del progettista deve essere posta anche sull'aspetto energetico, in quanto la ricerca di un minimo per l'energia porta sicuramente ad un miglioramento dell'efficienza dell'intero progetto.

Il lavoro è articolato nel seguente modo: i primi tre capitoli presentano definizioni, teoremi ed esempi riguardanti le *Guardian Maps*, seguiti dalla spiegazione degli algoritmi per la sintesi e lo scheduling di un sistema di controllo.

Nel capitolo 4 saranno poi descritte le Qualità di Volo, con le quali stabilire i vincoli per i poli in ciclo chiuso, e le architetture dei controllori scelti.

I successivi capitoli 5, 6 e 7 illustreranno poi i modelli della dinamica del volo utilizzati, prima in generale e poi in modo specifico per i due velivoli scelti: il Boeing 747 e l'F16.

Nel capitolo 8 sarà descritto in dettaglio come l'algoritmo di sintesi può essere applicato ad un sistema di controllo di volo, mentre il successivo capitolo 9 è dedicato allo scheduling di questo secondo un parametro.

Il capitolo 10 presenterà la procedura di ottimizzazione, introducendo la funzione obiettivo scelta, l'energia del controllo, e il modo di calcolarla; seguirà poi l'impostazione vera e propria del problema di ricerca del minimo, illustrando gli algoritmi utilizzati, i relativi risultati ottenuti e, infine, un confronto tra essi.

Nel capitolo 11 saranno riportati i risultati dell'ottimizzazione, illustrando poi il modo di presentare i dati ottenuti dal progetto dei controllori di volo, per i due aerei scelti e in diverse condizioni di volo.

Questi risultati saranno riportati infine nelle ultime quattro parti, con grafici e tabelle.